

UNIVERSITÉ DE LIÈGE

Cours de Constructions du Génie civil

n° 64



Le Réglage des Efforts dans les Constructions

par

F. CAMPUS

Professeur à l'Université de Liège

ÉDITEUR : **A. I. Lg.**

QUAI PAUL VAN HOEGAERDEN, 12

LIÈGE

LE RÉGLAGE DES EFFORTS DANS LES CONSTRUCTIONS

par F. CAMPUS,

Professeur à l'Université de Liège

La conception classique du calcul des constructions est purement passive. S'il s'agit d'éléments isostatiques, la répartition des efforts sous l'effet des sollicitations, tant mortes que vives, est entièrement déterminée par les lois de la statique, sous réserve d'hyperstaticités internes plus ou moins réelles (poutres métalliques rivées ou soudées à âmes pleines, poutres en béton armé). Dans les systèmes hyperstatiques, on calcule la distribution des efforts selon certaines hypothèses, dont les plus usuelles sont celles de l'élasticité.

Plus récemment, on a préconisé d'employer plutôt les hypothèses de la plasticité. Il en résulte généralement une autre distribution des efforts, mais, en tout état de cause, les distributions ainsi déterminées sont entièrement passives et dépendantes d'hypothèses de calcul plus ou moins arbitraires. Implicitement, elles résultent d'intégrations pour lesquelles les conditions initiales ou aux limites sont arbitrairement fixées. Par exemple, lorsque l'on admet l'hypothèse de l'élasticité, elle implique un état initial non contraint de la matière. L'hypothèse de la plasticité se greffe généralement sur la précédente, à partir d'une certaine limite arbitraire d'élasticité.

Ces observations ne s'appliquent pas seulement au calcul proprement dit, numérique ou graphique. Elles sont également valables pour toutes les méthodes physiques ou expérimentales de calcul, par la photo-élasticimétrie, par l'influenciométrie et par la similitude, ainsi que pour les diverses analogies hydrodynamique, électrique, etc.

Ces méthodes physiques se prêtent mal à la détermination des effets des sollicitations massiques. C'est aussi pour ces effets que le calcul proprement dit est le moins aisé ou le moins certain. L'action massique la plus habituelle en matière de constructions est la gravité. Liée invariablement, peut-on dire, à la matière de la construction dans tous ses avatars, elle contrevient directement à l'hypothèse de l'état initial non contraint. Les conditions initiales réelles de la construction diffèrent toujours de cette hypothèse, plus ou moins selon les cas.

Il en résulte, quel que soit le principe de la théorie appliquée, élasticité ou plasticité, que la distribution réelle des efforts diffère toujours, plus ou moins, de celle qui est calculée. Les écarts entre les calculs et les mesures des effets ne

mettent pas en cause les principes de la statique. Lorsque les calculs sont corrects, ces écarts dépendent essentiellement des écarts des conditions initiales réelles et supposées.

Ils ne proviennent pas seulement des effets du poids. D'autres circonstances peuvent donner lieu à des contraintes initiales, contrevenant à l'hypothèse de l'état initial non contraint. Ce sont, par exemple, les tensions de laminage, de soudure et de retrait; les efforts de montage, de tassement ou de déplacement des appuis, etc. Elles sont assimilables à des conditions initiales, dont le sens mathématique n'est pas altéré du fait que, physiquement, elles se rapportent éventuellement à des phases initiales d'une certaine durée.

Les méthodes ordinaires de calcul ne peuvent porter ces effets en compte que très malaisément ou d'une manière très incertaine. Les méthodes se servant de modèles réduits se prêtent encore moins à la détermination de ces effets; le plus souvent elles les négligent.

Ce sont ces effets qui produisent l'indétermination de la distribution des efforts internes de beaucoup de systèmes isostatiques extérieurement. Pour cette raison, certains auteurs assimilent ces cas à des hyperstaticités internes; il y a été fait allusion plus haut. Cela ne constitue qu'une manière de parler. En fait, il s'agit essentiellement d'une contravention à l'hypothèse usuelle de l'état initial non contraint, qui est purement fictif, car la distribution initiale des efforts internes n'est pas nulle.

Habituellement, quelle que soit la méthode de calcul adoptée et quel que soit le degré de correspondance de ses résultats avec la réalité, on considère ces résultats comme indépendants du temps, c'est-à-dire invariables si les sollicitations extérieures ne changent pas. On comprend dans ces sollicitations extérieures non seulement les effets des surcharges, mais aussi les effets des variations de température; des déplacements éventuels des appuis, accidentels ou différés; des variations de volume, telles que le retrait, etc. Certains de ces changements de sollicitation créent à vrai dire des régimes variables, c'est-à-dire qui sont implicitement fonction du temps, mais la variable temps n'apparaît généralement pas dans le calcul de leurs effets. L'intervention de cette variable est explicite dans les phénomènes de relaxation dont certaines constructions sont le siège. Il s'agit, dans ce cas, d'une

« redistribution des efforts », qui varie plus ou moins continûment en fonction du temps sans variation extérieure de sollicitation.

Encore une fois, le calcul tient compte assez malaisément de cet effet ou avec peu de certitude. Quant aux modèles, ils peuvent être eux-mêmes le siège de ce phénomène, comme aussi des autres phénomènes perturbateurs de variation de volume ou de température, de tensions propres initiales, etc. Cela serait un avantage si ces effets étaient en « similitude » avec ceux de l'ouvrage réel et réglables à volonté. En règle générale, il n'en est rien; ces effets sont purement perturbateurs et on doit prendre des précautions pour les éviter.

En conclusion, on reconnaît que les méthodes classiques de calcul sont entachées d'incertitudes. Les ingénieurs ont fait et continuent à faire des efforts considérables pour éliminer ces incertitudes. On a cru notamment y parvenir par les mesures sur modèles, mais sur ce point il faut se garder des illusions. A supposer même que par une méthode quelconque l'ingénieur obtienne des résultats exacts, il aurait bien la satisfaction d'avoir forcé les secrets de la nature, mais il n'aurait cependant d'autre pouvoir que de les constater passivement, comme un lecteur enregistreur les idées d'autrui.

Or, tout ouvrage d'ingénieur répond à une intention. Il n'y a pas de raison, à priori, pour que les résultats de l'étude d'une construction répondent à cette intention. Si cela semble se produire le plus souvent pour les études des ingénieurs modernes, c'est par l'effet d'un véritable « conditionnement » auquel on ne prend pas garde. L'ingénieur moderne est diplômé, c'est-à-dire instruit suivant un programme scientifique, dont le principe implicite est l'obéissance aux lois naturelles. Il est ainsi préparé, dans certaines limites d'expérience, à choisir des dispositions de constructions qui donnent des résultats moyens bien connus et auxquels il ajuste plus ou moins consciemment ses intentions.

Il arrive, inconsciemment sans doute, que des ingénieurs s'écartent sans précautions suffisantes des limites d'application de leurs connaissances. Il en résulte parfois des accidents dont certains sont encore présents dans toutes les mémoires. Des autodidactes géniaux peuvent, sous ce rapport, avoir des inspirations plus libres et plus heureuses; les cas n'abondent pas en matière de constructions.

Depuis longtemps déjà, des constructeurs éminents, qui souvent ont été par surcroît de réels savants, ont réagi contre cette passivité de l'ingénieur à l'égard de la science des constructions. Dans un cas remarquable dont il sera question à la fin de ce rapport, il s'est agi de l'intuition géniale d'un pur savant théoricien. Ces ingénieurs ne portent pas leurs efforts sur la modification des méthodes de calcul. Ils obéissent aux mêmes principes que les calculateurs passifs.

mais, par des dispositions constructives et par des moyens mécaniques appropriés, ils réalisent des conditions initiales déterminées et plus ou moins réglables. De ce fait, ils règlent plus ou moins la distribution des efforts dans la construction. Le calculateur-constructeur devient ainsi un maître actif; il n'est plus un sujet passif.

Ce résultat n'est obtenu qu'imparfaitement par la méthode des rotules ou des joints, comme dans les poutres cantilever, qui transforment les poutres continues hyperstatiques en systèmes isostatiques, ou les arcs à trois rotules. Cette articulation multiple rend, par surcroît, les ouvrages insensibles aux petits déplacements des appuis. aux variations de température, de volume, etc. La possibilité de réglage des efforts est théoriquement assez étendue, par la variation de position des rotules. En pratique, elle est assez limitée et le mode opératoire n'est guère actif; il s'agit plutôt, pourrait-on dire, d'une passivité mitigée.

On peut exprimer la même opinion au sujet du béton fretté selon Considère, dont le fretage est passif, ce qui limite ses effets et ses applications.

La méthode active de réglage des efforts consiste à produire dans les constructions, par le moyen de certains de ses éléments, des efforts contrôlés, réglés et mesurés, produisant une distribution initiale des efforts dans toute la construction qui soit, si possible, parfaitement connue. A partir de cet état contrôlé et connu, les calculs pour toutes les sollicitations courantes se font en général par les méthodes ordinaires avec une certitude suffisante, sous réserve des effets perturbateurs signalés plus haut, surtout des effets du temps (relaxation). Naturellement, on s'efforce de réaliser par ce réglage des conditions optima.

Dans certaines applications, le réglage n'est pas limité à une opération initiale faite une fois pour toutes, mais peut être répété à n'importe quelle époque. Le premier réglage permet en général de corriger les effets de certaines actions antérieures, telles que le retrait, les déplacements d'appuis, les déformations des régions plastifiées, etc. Les réglages ultérieurs permettent de corriger les effets des actions perturbatrices agissant au cours du temps, notamment de la relaxation. Une telle possibilité peut conférer au système un grand degré de perfection.

Le plus souvent, le réglage actif des efforts s'applique à des systèmes hyperstatiques et, dans la plupart des cas, il consiste à imposer des valeurs contrôlées à certains efforts qui sont des inconnues hyperstatiques. On se rend compte que ceci détermine la solution complète de toutes les équations d'hyperstaticité, sous réserve qu'elles soient correctement établies, en tenant compte éventuellement de certains effets de plasticité. Dans les systèmes hyperstatiques de degré peu élevé, le réglage peut d'ailleurs s'appliquer à tous les efforts hyperstatiques, ce qui réduit les incertitudes au minimum.

En raison de ces dispositions, le réglage actif des efforts est considérablement supérieur, du point de vue de la sécurité, au réglage passif par le moyen de joints et d'articulations. Les constructions à articulations multiples sont non seulement plus déformables que celles dépourvues de joints, mais elles peuvent éventuellement présenter une certaine mobilité allant jusqu'à une tendance à l'instabilité. Les joints et les articulations sont des points singuliers délicats dont la résistance n'est pas toujours assurée. Ce sont là des faits établis par des accidents, dont les causes n'apparaissent qu'après coup aux auteurs des ouvrages. Les opérations de réglage actif des efforts réalisent en quelque sorte un essai de mise en charge qui prémunit éventuellement contre des faiblesses locales excessives ou des négligences de détail. Du moins, par leur nature même, elles ne peuvent, en général, pas introduire par elles-mêmes des causes d'insécurité.

La conception fondamentale du réglage des efforts ne peut être considérée comme une acquisition contemporaine de l'art de la construction.

Les anciens constructeurs ont eu, depuis longtemps déjà, recours aux ancrages et aux frettages, parfois réglables, qui restent deux importants moyens actuels de réglage des efforts. Les moyens perfectionnés de la technique et une conception plus systématique ou rationnelle de l'art et de la science des constructions ont permis des applications récentes du plus haut intérêt et d'une envergure plus considérable que celles des siècles précédents. Cependant, il est permis de penser que le développement théorique de la science du calcul des constructions au cours des dernières décades a incliné l'ingénieur à une passivité inconsciente plutôt qu'à une activité caractéristique dans le sens du réglage des efforts.

Cette disposition ne donne pas lieu, en effet, à des développements théoriques fondamentaux: elle correspond plutôt à une conception générale et essentiellement pratique de la construction, accessible aux ingénieurs que leur formation scientifique ou prétendue telle n'a pas asservis à l'application passive et automatique de certains préceptes, mais qui y ont au contraire puisé un enrichissement de leurs capacités constructives personnelles et libres. Il paraît difficile de la définir en termes moins généraux que Ch Rabut, qui l'appelait, dans son enseignement de l'Ecole nationale des Ponts et Chaussées à Paris, la « synthèse statique des constructions » et la définissait comme suit (1918): « Introduire dans un ouvrage en construction des réactions internes susceptibles de mesure exacte et déterminée à priori, de manière à abaisser le plus possible la fatigue maxima des matériaux. »

Cette définition est aussi générale que possible. Elle laisse entière l'initiative du constructeur; elle exclut tout automatisme. Elle implique seulement une connaissance parfaite de l'effet des efforts. Il est à remarquer que les réactions internes préa-

lables ne sont pas nécessairement de sens opposés à celles dues aux charges. Par exemple, dans les tirants des arcs et dans les frettés cylindriques, qui sont deux dispositifs classiques de réglage des efforts, les tensions préalables sont du même sens que celles engendrées dans ces éléments par les charges. Bien entendu, il faut qu'elles exercent sur d'autres tensions engendrées par les charges une action compensatoire, mais on voit que ce n'est qu'au prix de majorations de tensions ailleurs et qu'il faut établir un compromis favorable entre ces effets opposés.

L'idéal est de pouvoir majorer des tensions relativement faibles ou peu dangereuses pour compenser celles qui sont relativement fortes ou dangereuses. Cela n'est pas toujours possible sous une forme simple et peut exiger l'emploi de matériaux spéciaux à haute résistance, ce qui est souvent le cas pour les tirants et les frettés. Ces éléments seront aussi le plus souvent sollicités d'une manière homogène (traction ou compression simple), afin d'utiliser au mieux et de la manière la plus économique les hautes résistances des matériaux spéciaux.

La méthode du réglage des efforts, désignation préférable à celle de synthèse statique des constructions, est susceptible de nombreuses applications; elle ouvre un vaste champ à l'initiative des ingénieurs. Une étude systématique détaillée n'est pas impossible; elle se résoudrait en une catégorification de dispositions fréquentes, dont l'étude particulière a été faite dans la plupart des cas (ancrages divers, frettés) ou n'est pas difficile à concevoir par application des théories ordinaires de la résistance des matériaux.

Très souvent, l'indétermination initiale est en rapport avec les effets du poids, tant pour les ouvrages massifs que pour les constructions évi-dées et quelle que soit la nature des matériaux. On peut avec avantage chercher à tirer parti des charges permanentes de poids mort pour le réglage des efforts.

Pour les ouvrages massifs, cela peut se faire par des moyens qui rappellent les articulations et les joints dont il a été question plus haut et qui ont recours à une division de l'ouvrage. Il arrive que celle-ci soit permanente; plus souvent il y aura intérêt à prévoir une division temporaire pendant la construction, rendue inopérante après construction par solidarisation aussi parfaite que possible des éléments. Il n'est pas nécessaire d'insister sur les applications assez connues de ces principes à la construction des voûtes massives, des écluses massives, des barrages-poids, etc. Remarquons seulement que des conceptions rationnelles peuvent rencontrer des difficultés pratiques considérables. Un ingénieur espagnol, M. Peña Boeuf, a proposé au Premier Congrès international du Béton et du Béton armé, à Liège en 1930, la subdivision d'un barrage-voûte en anneaux indépendants superposés; l'inconvénient réside naturellement dans la nécessité d'établir

entre ces anneaux des joints étanches sous forte pression et déformables. Dans le même ordre d'idées, le moyen le plus parfait de déterminer la répartition initiale des réactions du sol sous un barrage-poids serait de le construire par un ensemble de colonnes contiguës, de section carrée assez faible et de hauteur variable. Avant mise en charge, il faudrait naturellement solidariser toutes ces colonnes, d'une manière résistante et étanche, ce qui est la pierre d'achoppement du procédé.

Une subdivision suivant des surfaces isostatiques a été réalisée dans des barrages-poids et des piles de barrages en voûtes multiples. On ne peut pas être absolument certain de son effet statique, car les isostatiques sont tracées d'après le calcul ordinaire passif et sont de ce fait arbitraires, au moins dans le voisinage de la base. On pourrait éventuellement envisager de se rapprocher par la photoélasticité de tracés aussi vraisemblables que possible des isostatiques. Ce problème préoccupait déjà le regretté Aug. Mesnager. En tout état de cause, les applications actuelles ou possibles de ces subdivisions des massifs de maçonnerie, même lorsqu'elles ne sont que temporaires, constituent une forme qu'on pourrait aussi appeler de passivité mitigée plutôt que d'activité dans le réglage des efforts.

Une utilisation plus active du poids mort est possible et assez répandue pour les murs de soutènement : murs en surplomb vers les terres, murs dits à chaises, consoles d'équilibrage en saillie vers les terres, surplomb vers l'amont des murs de barrages, etc.

Pour les ouvrages à systèmes fléchis, tels que les ponts, un lestage approprié réalise dans certains cas un réglage actif des efforts. On envisage ici le lestage permanent de systèmes le plus souvent isostatiques, qui peuvent aussi être éventuellement hyperstatiques. Ce lestage n'a donc rien de commun avec l'équilibrage des ponts mobiles ; il est destiné uniquement à créer des efforts internes compensateurs permanents dans certaines parties des ouvrages.

Il n'est pas nécessaire d'insister sur les applications simples bien connues de cette méthode (p. ex. le pont de la rue Grétry sur la Dérivation à Liège). Remarquons seulement que la disposition entraîne nécessairement une forte surcharge des appuis et peut éventuellement rencontrer de ce fait des difficultés. D'autre part, il faut, en principe, envisager un lestage autonome de tous les éléments, ce qui évite toute indétermination, mais peut présenter des inconvénients au point de vue des déformations et des déplacements. Ceux-ci sont évités par des ancrages dans des masses pesantes, faisant corps avec les massifs d'appui, par exemple, mais il en résulte nécessairement une hyperstaticité, même si les efforts sont réglés initialement dans les tirants.

Le réglage des efforts exclut d'ailleurs, d'après la définition de Rabut, toute disposition ne réalisant pas des efforts mesurés et réglables, par

exemple des ancrages et des frettages passifs. Cependant, ce réglage ne conduit pas à des résultats d'une perfection toujours égale. En dépit de la connaissance exacte des efforts introduits dans la construction, la distribution des tensions n'est pas toujours entièrement déterminée. D'autre part, les dispositions nécessaires pour le réglage des efforts peuvent être parfois complexes, délicates et coûteuses. Enfin, la relaxation intervient parfois pour atténuer progressivement les effets du réglage. En d'autres termes, le réglage des efforts n'est pas toujours également efficace, durable, simple et économique. Il demande donc un examen attentif, qui est d'ordre expérimental plutôt que théorique et qui, de nouveau, fait appel davantage aux capacités personnelles de l'ingénieur qu'à des connaissances standardisées.

Un cas assez complexe et problématique, bien que d'apparence simple, est celui de l'ancrage dans les terres d'un massif de soutènement, avec tension contrôlée et réglable du tirant. Comme le tirant ne peut être tendu effectivement que si le massif est en place, il est nécessaire d'établir des puits ou des galeries permettant l'accès aux appareils de tension et aux dynamomètres. Cependant, le frottement des terres sur les tirants peut encore fausser les efforts transmis au massif, tandis que la flexion des tirants par tassement du sol peut faire naître dans le tirant des tensions inconnues ou même provoquer leur rupture. Pour éviter cela, il faut entourer les tirants de gaines résistantes et indéformables. On conçoit que ces dispositions deviennent très compliquées et coûteuses. Cependant, en raison des incertitudes sur la poussée des terres, la distribution exacte des efforts dans le massif n'est pas déterminée avec certitude. Aussi, ce dispositif n'est-il généralement envisagé que pour améliorer la stabilité de murs menacés de renversement et encore dans ce cas paraîtra-t-il souvent plus théorique que pratique. Des dispositions réduisant la poussée seront généralement plus promptes, plus simples et plus économiques, d'ailleurs parfaitement efficaces.

Une application remarquable d'ancrages de consolidation est celle qui a été faite par M. Coyne au barrage-poids algérien des Cheurfas (voir *Le Génie Civil* du 23 août 1930). Elle a vivement retenu l'attention et d'une manière très méritée. Cependant, cette disposition n'a été appliquée systématiquement à aucun ouvrage neuf du même type, alors que ce serait beaucoup plus facile et plus économique que pour un ouvrage existant. Il existe à cela des raisons financières, sans doute. On connaît des formes plus économiques de barrages que les barrages à gravité. Ensuite, l'introduction dans les barrages-poids d'efforts, même connus et réglés, près de la face amont, n'augmente pas la certitude de leur calcul. Elle augmente sûrement la sécurité d'un barrage-poids qui inspire des doutes et pour lesquels la crainte de l'accident justifie des dépenses spéciales de renforcement. La disposition présente

donc moins d'attraits pour un ouvrage neuf que pour une consolidation; cette remarque s'applique souvent aux tirants d'ancrages et à d'autres dispositifs tels que les frettages ⁽¹⁾.

Ces derniers sont d'emploi tout indiqué pour les conduites cylindriques sous pression, réalisées en matériaux divers : acier, bois ou béton. Une application ingénieuse a été utilisée au barrage de Marèges par M. Mary, collaborateur de M. Coyne, pour la réalisation d'une canalisation en béton avec frettes mises sous tension préalable. (Voir 2^e Congrès international des Ponts et Charpentes à Berlin, 1936. *Publication préliminaire*.) La mise en tension préalable des frettes a été appliquée par divers moyens à la confection de canalisations en béton armé préfabriquées de gros diamètre. Cette technique n'est pas sans aléas, notamment du point de vue de la conception correcte du réglage des efforts et du point de vue pratique de la confection. Un constructeur de la région de Liège a mis au point, pour une firme belge, une machine remarquable d'enroulement et de mise sous tension réglable des fils de frettes de tuyaux en béton. Ces tuyaux, en béton fretté activement, sont appelés tuyaux en « béton précontraint » et certains sont d'ailleurs aussi précontraints longitudinalement.

Le béton précontraint désigne plus spécialement des poutres de béton fléchies, comprimées intérieurement dans les parties destinées à être tendues par flexion, au moyen de tirants préalablement tendus en acier à très haute résistance. En fait, on peut envisager de disposer de telles barres spécialement tendues dans toutes les régions du béton qui devront supporter des tensions, de manière à y engendrer préalablement des compressions au moins égales. Donc, en principe, les barres du béton précontraint pourraient être disposées exactement comme les barres tendues du béton armé ordinaire, y compris les barres relevées, mais avec tension préalable.

L'avantage réside dans l'absence de fissures, ce qui entraîne une moindre déformabilité de flexion. C'est une application typique du principe du réglage des efforts, depuis longtemps préconisée et depuis peu en voie de mise au point. Elle ambitionne un caractère assez général, puisque l'on parle de « béton précontraint » de la même manière que l'on parle de « béton armé », c'est-à-dire comme d'un procédé général de construction. La différence des deux procédés est indiquée ci-dessus. Il en résulte que le béton précontraint est un peu plus restrictif que le béton armé, puisque la précontrainte ne joue aucun rôle dans le béton armé comprimé, qui reçoit des applications étendues.

Le béton précontraint subit les effets de la relaxation du béton et des armatures fortement tendues. Ces effets sont entachés de quelque

incertitude. A ce point de vue, il est intéressant de pouvoir retendre les tirants à diverses époques, pour compenser les effets de la relaxation.

Le réglage des efforts appliqué aux ouvrages en béton armé n'a pas nécessairement la forme de la précontrainte ⁽¹⁾. Il peut s'y appliquer d'une manière qui pourrait aussi convenir à des ouvrages en acier, par exemple, d'autant mieux que le béton armé facilite souvent l'exécution. Un exemple intéressant est celui du pont-rail en béton armé sur le Luabala à Kongolo, au Congo belge (voir la notice publiée sur cet ouvrage par M. R. Coppée).

Il s'agit d'un pont à poutres continues dans lequel on a réservé en cours d'exécution des joints. Les diverses parties ont été solidarisées alors qu'elles supportaient des surcharges qui créaient des sollicitations compensatoires des sollicitations maxima en service dans certaines parties de l'ouvrage.

Le réglage des efforts a été heureusement combiné avec un programme systématique d'exécution, les charges de réglage étant réalisées de manière économique par les matériaux et le matériel d'exécution. Eventuellement, eu égard aux formes des poutres à hauteur variable, les surcharges temporaires augmentaient la sollicitation de certaines parties plus résistantes au bénéfice d'autres parties moins résistantes.

Une disposition ayant quelque analogie, bien que sans intervention de surcharges temporaires, a permis de réduire à l'extrême l'épaisseur au milieu du nouveau Pont Léopold sur la Meuse à Liège, afin d'augmenter le tirant d'air. Il s'agit d'un joint temporaire au milieu de la travée centrale, dont les deux parties contiguës ne sont solidarisées qu'après décoffrage. Une disposition semblable a été utilisée pour la construction du pont-rail en béton armé sur la Lukuga au Congo belge.

Une autre disposition fréquente réside dans la tension préalable des tirants d'arcs. Elle a déjà été réalisée de diverses manières, soit par traction directe sur les tirants au moyen de vérins, soit par courbure des tirants. Au nouveau pont de Wandre sur le canal Albert, une mise en tension préalable des tirants est prévue par des moyens techniques modernes.

Deux constructeurs belges, MM. Robert et Mussette, préconisent des poutres triangulées métalliques bow-string à diagonales excentrées, pour éviter les goussets d'assemblage. En vue de réduire les flexions secondaires qui en résultent, surtout dans les membrures, ils prévoient le réglage des efforts dans certaines diagonales et dans la membrure inférieure. Une étude comparative, proposée à deux étudiants à l'occasion de leurs travaux de fin d'études, a montré qu'il n'était pas nécessaire d'excentrer les diagonales

⁽¹⁾ Cependant, M. Coyne a réalisé diverses applications particulières de ses tirants d'ancrage à des constructions de barrages, caractérisées par une grande ingéniosité.

⁽¹⁾ Voir Eug. FREYSSINET, *L'amélioration des constructions en béton armé par l'introduction de déformations élastiques systématiques* (Le Génie Civil, 15 sept. 1928).

pour supprimer les goussets, que les assemblages centrés réduisent les flexions secondaires (ce qui est bien connu) et enfin qu'il n'est pas plus difficile de régler les efforts pour atténuer les flexions secondaires dans le cas de diagonales centrées que dans le cas de diagonales excentrées. Il est, en effet, évident que le réglage des efforts n'est l'apanage d'aucun système particulier.

Il y a seulement des degrés dans sa simplicité, son efficacité, son exactitude et son économie. En outre, il n'est tout à fait parfait que lorsque ses effets sont entièrement connus sans ambiguïté, ce qui n'est pas le cas, par exemple, pour les murs de soutènement ancrés et les barrages ancrés. Par contre, une application qui est en tous points parfaite, efficace, économique et simple, c'est le décintrement et le réglage des voûtes par des vérins d'ouverture à la clef.

Non seulement ce dispositif permet un premier réglage facile, mais, en laissant subsister les logements des vérins à la clef, comme nous l'avons fait pour certains ouvrages, un réglage ultérieur est toujours possible. Les effets de la relaxation peuvent donc être corrigés, de même que des effets éventuels de déversements différés des appuis, etc.

Les premières applications de cette méthode sont dues à Eug. Freyssinet (*Le Génie Civil*, 30 juillet 1921, 6 août 1921 et 13 août 1921).

Il est beaucoup moins connu que l'idée en a été exposée, avec une précision de détail qui frappera tous ceux qui ont pu assister à une telle opération, par le professeur Junius Massau, de l'Université de Gand, dans son remarquable *Mémoire sur l'intégration graphique et ses applications* édité en 1885 à Paris et à Liège. J. Massau était alors Ingénieur des Ponts et Chaussées, mais son ouvrage est purement théorique. Il est intéressant de noter, à ce Congrès du Centenaire de l'A. I. Lg., que ce mémoire est extrait de la *Revue universelle des Mines*, tome XVI, 1884. Né en 1852 à Gosselies (Hainaut), J. Massau devint Inspecteur général des Ponts et Chaussées, mais en qualité de professeur de mécanique rationnelle à l'Université de Gand. Membre de l'Académie royale des Sciences de Belgique, il était aussi membre correspondant de l'Institut de France. La disposition qu'il décrivait dans son paragraphe 511, intitulé *Voussoirs-verrins*, et dont la première application remonte à vingt-quatre années plus tard ⁽¹⁾, est aujourd'hui d'usage courant et l'une des plus remarquables applications de la méthode de réglage des efforts.

Le réglage des efforts est certes appelé à se répandre de plus en plus dans les constructions. C'est un procédé universel et particulièrement fécond. Il réserve aux ingénieurs de l'avenir des possibilités considérables de faire œuvre person-

nelle et intelligente, en dépit d'une tendance prononcée d'automatisme dans leur formation, contre les effets stérilisants de laquelle il est utile de mettre en garde.

Annexe

Reproduction du § 511

du « *Mémoire sur l'intégration graphique et ses applications* », de J. Massau

VOUSSOIRS-VERRINS

Il n'est pas démontré que le ciment possède réellement les propriétés qu'on lui attribue; si même ces propriétés existent pour certains ciments, il n'est pas toujours possible d'avoir du ciment de cette qualité. Nous proposons le moyen suivant pour provoquer l'existence d'une courbe de pression déterminée dans une voûte construite avec du mortier ordinaire.

Etablissons provisoirement comme clefs, des voussoirs-verrins, c'est-à-dire des appareils formés chacun de deux plaques de fonte séparées par un verrin. Un levier agit sur ce verrin. On peut réaliser une poussée de grandeur déterminée en faisant agir, sur ce levier, un poids que le calcul indique. Lorsque tous les tassements sont produits, remplaçons successivement chaque appareil par une clef en pierre bien dressée que l'on chassera de manière à changer le moins possible la courbe de pression.

Il est d'abord évident que par ce procédé le mortier durcit sous pression et qu'on peut décintre après le durcissement; mais nous croyons que ce procédé de construction aurait bien d'autres avantages.

Supposons d'abord la poussée nulle; le poids des voussoirs repose sur le cintre et le fait fléchir; vers les reins seulement une composante du poids des voussoirs produit une courbe de pression. Dès que la poussée se produit, il faut nécessairement que la pression des voussoirs sur le cintre diminue; sinon, il se produirait une courbe de pression qui coïnciderait avec la ligne d'action de la poussée, cette courbe de pression est instable, elle provoque une charnière à l'extrados. Il faut donc admettre que la poussée va produire des compressions des joints vers l'extrados et que la voûte va se relever au-dessus des cintres; si la poussée est suffisamment grande, le cintre reprendra sa forme primitive; le décintrement est alors un fait accompli puisque la voûte ne repose plus sur le cintre. On pourra donc ainsi réaliser mathématiquement une courbe d'intrados ayant la forme du cintre avant la flexion. En choisissant convenablement la poussée que l'on produit, on pourra réaliser la courbe de pression la plus favorable à la résistance. Si la voûte a une forme d'équilibre, on réalisera la courbe de pression centrale. Dans tout autre cas, on réalisera la courbe de pression qui s'éloigne le moins de l'arc moyen: c'est la courbe qui correspond à $n = 0$ puisque pour cette courbe on a $c_1 = 0$, $c_2 = 0$.

⁽¹⁾ Dans son article sur le pont de Villeneuve-sur-Lot du 30 juillet 1921, M. Eug. Freyssinet indique qu'il a utilisé le système pour la première fois en 1908 pour une arche d'essai à Moulins, de 50 m d'ouverture et surbaissée au 1/25.